VIŠEKRITERIJUMSKO VREDNOVANJE I IZBOR PROZORA

MULTICRITERIA EVALUATION AND WINDOW SELECTION

Jasmina DRAŽIĆ
Mirjana LABAN

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 674.21
doi: 10.5937/grmk1503037D

1 UVOD

U fazi projektovanja fasadnog platna, prozori i prozorski otvori svojim položajem, veličinom, oblikom, podelom, odnosom punim i transparentnim površinama, veoma utiču na njegov izgled, kao i na estetski doživljaj [2]. Poznato je da dobro projektovan i konstruisan prozor treba da zadovolji istovremeno više katkad i kontradiktornih funkcija: osvetljavanje, osunčanje, provetravanje, ali i zaštita od atmosferilija, sunca, vetra, toplote, buke, te vizuelna povezanost unutrašnjih prostora sa spoljašnjim prostorom, ali i zaštita od pogleda spolja. Da bi obezbedio osnovnu funkciju, prozor mora da zadovolji niz standarda kojima se ispunjavaju opšti i posebni tehnički uslovi za taj građevinski elemenat [1]. Prozor dolazi na mesto izgradnje objekta kao gotov elemenat, pa proizvođač atestima dokazuje njegove karakteristike, a pravilnom ugradnjom i završnim obradama, izvođač radova treba da obezbedi zahtevani kvalitet projektovanog elementa.

U početku su se za proizvodnju prozora koristili isključivo prirodni materijali, razne vrste drveta (čamovina, hrast, trešnja i dr.), dok danas proizvodnja prozora uključuje i primenu drugih materijala (npr. PVC, aluminijuma), kao i njihovu kombinaciju u okviru jednog elementa. Svaki od ovih materijala ima različita tehnička svojstva, pa kada se upoređuju i vrednuju karakteristike prozora proizvedenih od ovih materijala, svaki od njih ima i prednosti i nedostataka [12]. Za zastakljivanje prozora mogu se koristiti različiti tipovi stakala [2]. Primena dvostrukog ili trostrukog izolacijskog stakla male emisije tzv. Low-e stakla, znatno smanjuje koefici-

1 INTRODUCTION

When designing a façade, windows and window openings display a great impact on the appearance and aesthetics with their position, size, form, division, as well as the ratio between full and transparent areas [2]. It is well known that a well designed and constructed window has to satisfy a number of functions simultaneously, which can be contradictory at times. These include lightening, shading, airing, protection from weathering, sun, wind, heat, noise, as well as visual connection between inner and outer space, together with the protection from the views from outside. In order to provide its fundamental function, a window has to satisfy a set of standards that ensure general and specific technical conditions for that construction element [1]. The window arrives to the building site as a finished product; hence, the manufacturer provides attestations to prove the characteristics. On the other hand, with the proper installation and processing, the contractor has to provide the set quality of the designed element.

At the beginnings, exclusively natural materials, like various types of timber (fir, oak, cherry, etc.), were used for window manufacturing; today, however, window manufacture includes the application of other materials as well, such as PVC, aluminium, as well as their combination within an element. Each of these materials possesses diverse technical properties, hence, when windows made of different materials are compared, each one can present certain advantages and drawbacks [12]. Different types of glass can be utilized for glazing the windows [2]. The application of double or triple pane

Jasmina Dražić, dr, Fakultet tehničkih nauka
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
e-mail: dramina@uns.ac.rs
Mirjana Laban, dr, Fakultet tehničkih nauka
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
e-mail: mirjana.laban@core-ns.org

Jasmina Dražić, PhD, Faculty of Technical Sciences
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
e-mail: dramina@uns.ac.rs
Mirjana Laban, PhD, Faculty of Technical Sciences
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
e-mail: mirjana.laban@core-ns.org

jent prolaza toplote, pa doprinosi rešenju problema energetskih gubitaka u objektu. Možemo konstatovati da je osnovna funkcija prozora ostala ista kroz vreme, ali su vidna poboljšanja u estetskom smislu i tehničkim karakteristikama, kojima se postiže adekvatan nivo zaštite i obezbeđuje racionalno korišćenje energije za zagrevanje i hlađenje [11].

Spoj i kombinacija više materijala u okviru prozora (drvo, PVC, aluminijum, za doprozornik i prozorsko krilo, dvostruko, trostruko termoizolaciono staklo, staklo, s Low-e premazom ili bez njega), formira građevinske elemente različitih tehničkih karakteristika. Prateći trend razvoja, građevinska industrija nudi širok asortiman različitih elemenata, pa otvara problem izbora najpovoljnijeg. Kako je u analizu izbora prozora potrebno uvrstiti veći broj raznorodnih pokazatelja (pokazatelji u pogledu energetske efikasnosti, pokazatelji kvaliteta boravka u objektu, pokazatelji efektivnosti gradnje, trajnost, ekološki faktor itd.), rešenje problema izbora prozora podrazumeva višekriterijumsko odlučivanje. Naime, potrebno je uskladiti projektne i izvođačke zahteve, te zahteve korisnika, s karakteristikama prozora i iz toga izvući maksimum, a pravilnim odabirom kriterijuma objediniti bitne faktore za ocenu optimalnog rešenja.

U radu je predložena metodologija višekriterijumskog vrednovanja prozora, algoritam toka odlučivanja, kriterijumi, model i metoda optimizacije. Variranjem četiri tipa prozora (materijala za doprozornik i prozorsko krilo) s različitim zastakljenjem (dvoslojno i troslojno staklo), izabrano je optimalno rešenje.

2 VIŠEKRITERIJUMSKO ODLUČIVANJE PRI IZBORU PROZORA

Uglavnom primenjivani metod vrednovanja u građevinarstvu zasnivao se na upoređivanju varijanti na osnovu jednog - najčešće finansijsko-ekonomskog - kriterijuma, bez potrebe uvođenja i vrednovanja i ostalih mogućih aspekata. Posledice ovakvog pristupa jesu subjektivno, iskustveno i nedovoljno dokumentovano obrazloženje rezultata i konačne odluke. To je iniciralo da se prilikom izbora najpovoljnijeg tipa prozora predloži metodologija vrednovanja i odlučivanja koja će obuhvatiti, osim finansijsko-ekonomskih kriterijuma, tehničko-tehnološke, ekološke i druge kriterijume.

Kompleksan proces optimizacije obuhvata:

- generisanje skupa mogućih varijantnih rešenja;
- vrednovanje varijanti prema usvojenim kriterijumima;
- rangiranje varijantnih rešenja;
- analizu i izbor najpovoljnije varijante.

Najpovoljnija varijanta tada predstavlja optimalno rešenje optimizacionog zadatka odnosno kompromis između želja (kriterijuma) i mogućnosti (ograničenja). Kriterijum se izražava kriterijumskom funkcijom koja za najpovoljniju varijantu (rešenje) treba da dostigne globalni ekstremum s obzirom na ograničenja, kao uslova za mogućnost postizanja cilja optimizacije [4].

Za većinu problema koji se pojavljuju i rešavaju u inženjerskoj praksi teško je ili čak nemoguće formulisati sveobuhvatni matematički model optimizacije, pa se primenjuje „prilaz diskretnih modela” i projektuju varijantna rešenja [5]. U skladu s definisanim ciljem - ostvariti ekstremne vrednosti usvojenih kriterijuma,

insulated glass of low emissivity, i.e. low-E glass, significantly reduces the heat loss coefficient, thus contributing to the solution of energy losses in an object. It can be stated that the main function of windows has remained the same over time, though the evident improvements in the aesthetic sense and technical properties, leading to an adequate level of protection and providing the rational energy usage for heating and cooling, have been beneficial [11].

The joining and combination of several materials within a window (timber, PVC, and aluminium for the window frame and sash; double and triple pane thermal insulated glass, glass with or without the low-E coating for glazing) forms the structural element with diverse technical characteristics. Following the development trend, the construction industry offers a wide range of different elements, thus opening the problem for selecting the most suitable one. Since the analysis of window selection requires a greater number of diverse indicators (indicators related to energy efficiency, indicators related to the living quality in the object, indicators of the construction efficiency, durability, ecological factor, etc.), the solution for the window selection implies a multicriteria decision making. Namely, it is necessary to coordinate the demands by the designer, the contractor and the user with window characteristics and seize the maximum from the entire project, while consolidating the important factors for evaluating the optimal solution with the proper criteria selection.

The paper proposes the methodology for multicriteria window evaluation, the decision flow algorithm, as well as the criteria, model and methods for optimization. The variations in four window types (materials for frames and sash) with diverse glazing (double and triple pane glass) lead towards the selection of the optimal solution.

2 MULTICRITERIA DECISION-MAKING IN WINDOW SELECTION

The most applied evaluation method in construction is based on comparing the variation based on one, typically financial-economic criterion, without the need to introduce and evaluate other possible aspects. The consequences of this approach are subjective, inexperienced and under-documented explanations of the results and final decisions. This situation has initiated the procedure to propose the methodology of evaluation and decision-making into the procedure of selecting the most suitable window type that will, apart from the financial-economical criterion, include technical-technological, ecological, and other criteria as well.

The complex process of optimization includes the following:

- Generating the set of possible variation solutions,
- Evaluating the variations according to the set criteria,
- Ranking the variation solutions, and
- Analysing and selecting the most suitable variation.

The most suitable solution in that case presents the optimal solution of optimization task, i.e. a compromise between the demands (criteria) and possibilities (limitations). The criteria are expressed by criterion functions that should achieve the global extreme for the most suitable variation (solution) regarding the limitations that condition the possibilities for achieving the optimization

postupak rešavanja optimizacionog zadatka odvija se u više koraka i na više nivoa odlučivanja. Algoritam toka višekriterijumskog odlučivanja pri izboru prozora prikazan je na slici 1.

Prilikom višekriterijumskog odlučivanja, fazi generisanja mogućih varijantnih rešenja prozora prethodi analiza opštih i posebnih uslova. Opšti i posebni uslovi koje prozor treba da zadovolji generišu moguća varijantna rešenja, pri čemu svako varijantno rešenje opisuje različiti parametri u pogledu termoizolacionih karakteristika, zvučne izolacije, troškova i vremena ugradnje, trajnosti ugrađenog elementa i ekologije.

Slika 1. Algoritam toka višekriterijumskog odlučivanja pri izboru prozora

Skup mogućih rešenja generira se u skladu s projektnim zahtevima, zadatim Standardima za materijale i kompletne elemente i ograničenjima, a koje propisuje Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada za ovaj građevinski element.

U prvoj fazi odlučivanja, eliminišu se ona rešenja čiji parametri ne zadovoljavaju unapred postavljena ograničenja. U skladu s definisanim kriterijumima,

goals [4].

For most problems occurring and being solved in the engineering practice, it is hard or sometimes impossible to formulate the overall mathematical optimization model; hence, one has to apply the “discrete model approach” and design the variation solutions [5]. In accordance with the defined objective, which is to accomplish the extreme values of the set criteria, the procedure for solving the optimization task is undertaken in several steps and several decision levels. The algorithm of multicriteria decision-making flow in selecting the window is presented in Fig. 1.

Fig. 1. Algorithm for multicriteria decision-making flow in window selection

In the process of multicriteria decision-making, the analysis of general and specific conditions precedes the phase of generating the possible variation solutions for windows. General and special conditions for the window to satisfy generate the possible variation solutions, where each variation solution is described by diverse parameters related to thermal insulation properties, sound insulation, costs and construction time, durability

varijante se vrednuju i rangiraju. Problem izbora najpovoljnijeg tipa prozora sadrži više varijantnih rešenja i više kriterijuma na osnovu kojih se varijante vrednuju, a kako su kriterijumske funkcije različite po karakteru, numeričkim vrednostima i jedinicama, bez primene adekvatne metode - nemoguće je doći do rešenja.

Za rešavanje problema izbora najpovoljnijeg tipa prozora predloženo je višekriterijumsko odlučivanje koje obezbeđuje viši nivo objektivnosti prilikom donošenja odluka i metoda višekriterijumske optimizacije (VKO). Rezultat vrednovanja jeste rang-lista rešenja, koja pruža mogućnost da se usvoji konačno rešenje koje ispunjava zadate uslove u skladu s realnim ograničenjima. Primenom adekvatne metode višekriterijumske optimizacije, uvođenjem težinskih koeficijenata, moguće je dobiti više izlaza, rang-lista varijantnih rešenja i izabrati jedno konačno (optimalno) rešenje u drugoj fazi odlučivanja.

Ovakav pristup i tok aktivnosti u predloženoj metodologiji omogućava da odlučivanje i izbor najpovoljnijeg tipa prozora budu objektivni, dovoljno dokumentovani, s prihvatljivim stupnjem subjektivnosti, uz argumentovano obrazloženje svih rezultata.

of the element, and ecology. The set of possible solutions is generated in accordance with the project demands prescribed by the Standards for Materials and Complete Elements and in accordance with the limitations prescribed by the Regulations on Energy Efficiency of Buildings for this construction material.

In the first phase of decision-making, the solutions whose parameters fail to satisfy preset limitations are eliminated. In accordance with the defined criteria, variations are evaluated and ranked. The problem of selecting the most suitable window type contains several variation solutions and several criteria used to evaluate these variations. Since the criterion functions are diverse by character, numerical values and units, it is impossible to achieve the solution without the application of an adequate method.

For solving the problem of selecting the most optimal window type, multicriteria decision-making is proposed, since it provides the higher level of objectivity in the process of decision-making, together with the multicriteria optimization method. The evaluation result is the rank list of solutions that provides the possibility to adopt the final solution that fulfils the set conditions in accordance with real limitations. On applying an adequate method of multicriteria optimization by introducing the weight coefficients, it is possible to obtain several output results, then rank those variation solutions, and thus select one final (optimal) solution in the second decision-making phase.

This approach and the flow of activities in the proposed methodology enable the decision-making process and selection of the most optimal type of window to be objective, adequately documented with the acceptable degree of subjectivity, and argumentatively explained.

3 MATEMATIČKA FORMULACIJA PROCESA OPTIMIZACIJE

Metodologija višekriterijumskog odlučivanja pri izboru prozora bazirana je na početnoj matrici odlučivanja tipa $N \times J$, formiranoj od N -kriterijuma i J -varijanti. Matrica je prikazana u tabeli 1.

3 MATHEMATICAL FORMULATION OF THE OPTIMIZATION PROCESS

The methodology of multicriteria decision-making in selecting the window is based on the initial decision matrix type $N \times J$, formed from N -criteria and J -variations. The matrix is presented in Table 1.

Tabela 1. Početna matrica odlučivanja
Table 1. Initial decision-making matrix

	V	a	r	i	a	t	i	o	n
		V_1	V_2	...	...	...	...		V_j
K/C									
r	K_1	f_{11}	f_{12}	...	...				f_{1j}
i	K_2	f_{21}							
t	...	...							
e	...	...							
r	...	...							
i	K_N	f_{1n}							f_{nj}
a									

gde su:

V_j - varijante
 K_i - kriterijumi
 f_{ij} - vrednost kriterijumske funkcije

where:

V_j - variations
 K_i - criteria
 f_{ij} - values of criterion functions

3.1 Kriterijumi optimizacije

Formiranje matrice odlučivanja podrazumeva definisanje kriterijuma za vrednovanje varijantnih rešenja prozora. Da bi se obuhvatili bitni aspekti relevantni za izbor najpovoljnijeg tipa prozora, u model optimizacije uvršteni su raznorodni kriterijumi - kvantitativni, kvalitativni, tehničko-tehnološkog, ekonomsko-finansijskog i ekološkog karaktera. Definisani kriterijumi optimizacije jesu:

- f_1 - koeficijent prolaza toplote prozora;
- f_2 - pokazatelj svetlosne propustljivosti stakla;
- f_3 - pokazatelj zvučne izolacije prozora;
- f_4 - finansijski pokazatelj (cena prozora);
- f_5 - vreme ugradnje prozora;
- f_6 - pokazatelj trajnosti;
- f_7 - pokazatelj ekologije

Položaj prozora u spoljanjem omotaču zgrade uzrokuje gubitke toplotne energije, pa usmerava izbor u pravcu energetski efikasnog elementa. Termičke karakteristike prozora vezuju se za standard SRPS EN ISO 10077-1 *Toplotne performanse prozora, vrata i kapaka - proračun koeficijenata prolaza toplote - deo 1 opšte* [7] i standard SRPS EN ISO 10077-2 *Toplotne performanse prozora, vrata i kapaka - proračun koeficijenata prolaza toplote - deo 2 numerička metoda za okvir* [8]. Termičke karakteristike prozora definiše koeficijent prolaza toplote U_w [W/(m²·K)], koji zavisi od koeficijenta toplotne provodljivosti okvira U_f i koeficijenta toplotne provodljivosti stakla U_g . Proračunska vrednost koeficijenta prolaza toplote prozora, prema Pravilniku o energetskoj efikasnosti zgrada, mora da bude manja od vrednosti $U_{wmax}=1,5$ [W/(m²·K)] (ili jednaka s njom [6]). U skladu s kriterijumskom funkcijom f_1 , prednost imaju tipovi prozora s manjim vrednostima ove funkcije, jer obezbeđuju bolje toplotne performanse objekta i doprinose ukupnoj energetskoj efikasnosti objekta.

Prozori sa svojim staklenim delom primarni su elementi prirodnog osvetljenja enterijera i njegovog funkcionalnog korišćenja. Prirodno osvetljenje je najkvalitetniji izvor svetlosti u enterijeru i treba da određuje i arhitektonski i organizacioni koncept objekta. Cilj energetski efikasne gradnje, dakle, jeste smanjenje energetskih gubitaka na staklenim površinama, ali i težnja da se ostvari što bolje prirodno osvetljenje. Ovakav pristup u postupak vrednovanja prozora uvrstio je kriterijumsku funkciju f_2 - pokazatelj svetlosne propustljivosti stakla. Predloženi oblik kriterijumske funkcije f_2 , minimalnim vrednostima obezbeđuje veću svetlosnu propustljivost:

$$f_2 = P_s = 1 - p \quad (1)$$

gde je:

p - svetlosna propustljivost stakla

Prozor - kao građevinski elemenat - treba da obezbedi i adekvatnu zvučnu izolaciju. U zavisnosti od tipa objekta i unutrašnjih prostorija, dozvoljeni nivo buke se menja. Zvučnu izolaciju tretira grupa standarda SRPS ISO 140 *Akustika-merenje zvučne izolacije u zgradama i zvučne izolacije građevinskih elemenata* [9] i standard SRPS EN ISO 14351-1 *Prozori i vrata, standard za*

3.1 Optimization criteria

Forming the decision matrix implies definitions of criteria for evaluating the variation window solutions. In order to enclose the important aspects relevant for the selection of the most optimal window type, the model includes diverse criteria of quantitative, qualitative, technical-technological, economic-financial and ecological character. The defined optimization criteria are as follows:

- f_1 - coefficient of the window heat transfer
- f_2 - indicator of the light transparency of glass
- f_3 - indicator of the sound insulation of the window
- f_4 - financial indicator (price of the window)
- f_5 - time for window installation
- f_6 - durability indicator
- f_7 - ecological indicator

The position of the window in the outer façade of the building makes it responsible for heat energy losses, hence directing the selection towards the energy efficient element. Thermal window properties are related to the standard SRPS EN ISO 10077-1 *Heat performances of windows, doors and shutters - calculation of heat transfer coefficient - section 1 general* [7] and the standard SRPS EN ISO 10077-2 *Heat performances of windows, doors and shutters - calculation of heat transfer coefficient - section 2 numerical method for frames* [8]. Thermal properties of windows are defined by the heat transfer coefficient U_w [W/(m²·K)], which depends on the frame heat conductivity coefficient U_f and the glass heat conductivity coefficient U_g . The calculation value of the window heat transfer coefficient, according to the Regulation of Energy Efficiency of Buildings, has to be lower (or equal) to the value $U_{wmax} = 1.5$ [W/(m²·K)] [6]. In accordance with the criterion function f_1 , the advantage is provided for the window types with lower values of this function, since they provide better heat performances of the object and contribute to the total energy efficiency of the structure.

With the glass area, windows present the primary element of natural lightening of interior and its functional usage. Natural light is the most qualitative source of light in the interior and it should determine both the architectural and organizational concept of an object. An energy efficient building has the objective to decrease energy losses on glass surfaces, as well as the demand to provide as good natural lightening as possible. This approach in the evaluation procedure for windows demands the criterion function f_2 - indicator of the light transparency of glass. The proposed form of the criterion function f_2 provides greater light conductivity with minimal values:

where:

p - light conductivity of glass

The window as a construction element should provide adequate sound insulation as well. Depending on the type of structure and interior spaces, the permitted level of noise is altered. Sound insulation is treated by a group of standards SRPS ISO 140 *Acoustics - measuring the sound insulation in buildings and sound insulation of construction elements* [9] and

proizvod, karakteristike i performanse – deo 1 [10]. U zavisnosti od nivoa buke, prozori se svrstavaju u određene klase zvučne izolacije. Zvučna izolacije prozora označava se sa R_w , a izražava u dB. Vrednost zvučne izolacije prozora uslovljena je karakteristikama ugrađenih materijala, zvučnom izolativnošću stakla, zvučnom izolacijom doprozornika, okvira prozorskih krila, ali i zvučnom izolacijom spojeva i preklopa. U skladu s minimizacijom vektorske kriterijumske funkcije, definisana je kriterijumska funkcija f_3 , pokazatelj zvučne izolacije prozora u obliku:

$$f_3 = P_z = 1/R_w \quad (2)$$

gde je:

R_w – zvučna izolacija prozora.

Pri vrednovanju varijantnih rešenja prozora, prednost se daje manjim vrednostima ovog pokazatelja (kriterijumske funkcije f_3), jer one obezbeđuju veći nivo zvučne zaštite.

Da bi se obuhvatili pokazatelji koji su bitni u fazi izvođenja objekta i koji direktno utiču na efektivnost izgradnje, ukupne troškove i rok, u model optimizacije uvrštene su kriterijumske funkcije f_4 i f_5 . Kriterijumska funkcija f_4 jeste ekonomsko-finansijskog karaktera i predstavlja troškove nabavke prozora (tržišnu cenu), dok se kriterijumska funkcija f_5 , odnosi na vreme ugradnje prozora i izračunava se na bazi adekvatnih normativa i standarda rada u građevinarstvu [3]. Pri vrednovanju, prednost ima ona varijanta prozora u kojoj su vrednosti obe kriterijumske funkcije minimalne.

Vek trajanja prozora, ako se adekvatno održava, zavisi od karakteristika materijala, završne obrade, kao i od atmosferskih uticaja kojima je izložen. Kriterijumsku funkciju f_6 , definiše pokazatelj trajnosti prozora u obliku:

$$f_6 = P_t = T_{\max}/T_i \quad (3)$$

gde su:

$T_{\max}$ – maksimalna trajnost prozora u okviru razmatranih varijanti

T_i – pojedinačna trajnost prozora

Manja vrednost ovog pokazatelja odgovara tipu prozora koji ima veću trajnost.

Prozori su vrednovani i iz ekološkog aspekta, uvođenjem još jedne kriterijumske funkcije f_7 – pokazatelja ekologije. Mogućnost reciklaže materijala od kog su proizvedeni doprozornik i okvir prozorskog krila, data je opisnim kriterijumom [13].

the standard SRPS EN ISO 14351-1 *Windows and doors, standard for the product, characteristics and performances – part 1* [10]. Depending on the noise level, windows are divided into certain classes of sound insulation. Window sound insulation is denoted by R_w and measured in dB. The value of the window sound insulation is conditioned by the properties of the built-in materials, sound insulation of glass, sound insulation of frames, window casements, and sound insulation of joints and spacers. In accordance with the minimization of the vector criterion function, the criterion function f_3 – the indicator of the sound insulation – is defined in the following expression:

where:

R_w – sound insulation of the window.

In evaluating the variation solutions for the window, the advantage is provided for the smaller values of this indicator (criterion function f_3), since these provide higher level of sound protection.

In order to include the indicators that are relevant in the phase of object construction and which directly influence construction efficiency, overall costs and deadlines, criterion functions f_4 and f_5 are included into the optimization model. The criterion function f_4 has the economic-financial character and it presents the costs of obtaining the windows (market price), while the criterion function f_5 refers to the time necessary for installing the windows and it is calculated on the basis of adequate normative and working standards in construction [3]. In the evaluation process, the advantage is provided for the window variation where the values of both criterion functions are minimal.

Window durability, if maintained adequately, depends on the material properties, finishing, as well as the weathering. The criterion function f_6 is defined as the indicator of the window durability in the following expression:

where:

$T_{\max}$ – maximal window durability within the observed variations,

T_i – individual window durability.

Lower value of this indicator refers to more durable window type.

The windows can be evaluated from ecological aspect as well, by introducing another criterion function f_7 , the ecological indicator. The possibility to recycle the material from which the frames and sashes are manufactured is presented by the descriptive criterion [13].

Tabela 2. Opisni kriterijum – ekologija (održivi razvoj)

ekološki kriterijum (opis)			
PROZOR -drvo-	PROZOR -PVC	PROZOR -aluminijum-	PROZOR -drvo-aluminijum-
Drveni prozori su potpuno u skladu sa ekološkim zahtevima zbog mogućnosti recikliranja. Korišćenjem drveta pospešujemo održivi razvoj zemlje.	Ima mogućnost recikliranja, ali se primarno dobija iz neobnovljivih izvora.	Ima mogućnost recikliranja, ali se primarno dobija iz neobnovljivih izvora.	Kombinacija dva materijala, pa sublimira u sebi ekološki aspekt oba.

Table 2. Descriptive criterion – ecology (sustainable development)

Ecological criterion (description)			
WINDOW - timber-	WINDOW -PVC	WINDOW -aluminium-	WINDOW -timber-aluminium-
Timber windows are completely in accordance with ecological demands and the possibilities for recycling. Using wood, one increases the sustainable development of the country.	It has the possibility for recycling, though it is primarily produced from non-renewable sources.	It has the possibility for recycling, though it is primarily produced from non-renewable sources.	A combination of two materials, hence combining ecological aspects of both.

Da bi se pri vrednovanju prozora obuhvatio i ekološki aspekt, pre svega mogućnost recikliranja, predložen je način kvantifikacije ekološkog kriterijuma – rangiranjem.

In order to include the ecological aspect into evaluation, which primarily refers to the possibilities for recycling, there is a proposition for the manner of quantifying the ecological criterion by ranking.

Tabela 3. Pokazatelj ekologije

Table 3. Ecological indicator

PROZOR / WINDOW - drvo / timber-	PROZOR / WINDOW -PVC-	PROZOR / WINDOW - aluminijum / aluminium -	PROZOR / WINDOW - drvo-aluminijum - - timber-aluminium -
rangiranje / ranking			
1.0	2.0	2.0	1.5

Ulazni podaci za optimizaciju (početna matrica odlučivanja) jesu vrednosti pojedinačnih kriterijumskih funkcija ($f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$) za svaku varijantu. Model optimizacije za izbor najpovoljnijeg tipa prozora minimizira sve kriterijumske funkcije i definisan je u obliku:

The input data for the optimization (the initial decision matrix) are the values of individual criterion functions ($f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$) for every variation. The optimization model for selecting the most optimal window type for all criterion functions is defined in the following expression:

$$\min F(x) = \min (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7) \quad (4)$$

Kako su vrednosti pojedinačnih kriterijumskih funkcija date u različitim jedinicama i rasponima numeričkih vrednosti, sprovodi se normalizacija početne matrice odlučivanja. Analizom zahteva u problemu i mogućnosti metoda višekriterijumske optimizacije, za izbor optimalnog tipa prozora, predložene su metoda kompromisnog programiranja i metoda kompromisnog rangiranja alternativnih rešenja [4,5].

Since the values of individual criterion functions are presented in various units and ranges of numerical values, the normalization of the initial decision matrix has to be organized. After analyzing the demands in the problem and the possibilities of the multicriteria optimization method, the compromise programming method and compromise ranking method of alternative solutions are proposed for selecting the optimal type of the window [4, 5].

3.2 Izabrana metoda višekriterijumske optimizacije

Osnovna karakteristika **metode kompromisnog programiranja** jeste da se rešenje zadatka višekriterijumske optimizacije određuje minimizacijom odstupanja od idealne tačke, prema usvojenoj meri rastojanja, uključujući sve kriterijume. Kao mera rastojanja od idealne tačke u ovoj metodi koristi se Lp metrika, koja predstavlja rastojanje između idealne tačke F^* i tačke $F(x)$ u prostoru kriterijumskih funkcija. Rešenje kojim se postiže minimum funkcije kompromisnog programiranja naziva se kompromisnim rešenjem problema VKO s parametrom p.

Parametar p koji se javlja u izrazu Lp ima ulogu balansirajućeg faktora između ukupne korisnosti i maksimalnog individualnog odstupanja. Malo p koristi se

3.2 The selected method for multicriteria optimization

The main characteristic of the **compromise programming method** is that the solution to the multicriteria optimization task is determined by minimizing the deviations from the ideal point, according to the adopted interval measure, including all criteria. As a deviation measure from the ideal point, the method utilizes the Lp metrics that represents the interval between the ideal point F^* and the point $F(x)$ in the area of criterion functions. The solution to achieve the minimum of the compromise programming function is referred to as the compromise solution of the multicriteria optimization problem with the parameter p.

The parameter p occurring in the expression "Lp" has

kada grupna korist ima prednost nad pojedinačnim (individualnim) odstupanjima. Povećanjem parametra p , smanjuje se ukupna korist, ali se smanjuje i maksimalno pojedinačno odstupanje od najbolje varijante. Izborom parametra p , usvaja se strategija postizanja kompromisa u višekriterijumskoj optimizaciji:

- $p = 1$ rešenje je najbolje po svim kriterijumima posmatranim zajedno;
- $p = 2$ rešenje je geometrijski najbliže idealnoj tački;
- $p = \infty$ prioritet je dat kriterijumu s najvećim odstupanjima.

Donosilac odluke može zadati ili menjati tokom rešavanja zadatka VKO težine pojedinih kriterijuma. Ovo se postiže uvođenjem težinskih koeficijenata. Prilikom rešavanja zadatka VKO u prvom prolazu, određuju se kompromisna rešenja za različite vrednosti parametara $p = 1, 2, \infty$, pod uslovom da sve kriterijumske funkcije imaju iste težinske koeficijente. Analizom ovih rezultata, donosilac odluke može odlučiti da li i kakve težinske koeficijente da zadaje za sledeći prolaz. Cilj je da se uvede „težina“ pojedinih kriterijuma i da se ponovnim rešenjem zadatka kompromisnog programiranja ispita osetljivost rešenja u odnosu na težinske koeficijente.

Višekriterijumsko kompromisno rangiranje varijantnih rešenja primenjuje se kada je potrebno odrediti redosled planiranih alternativnih rešenja na osnovu datih mera dobrote ili kriterijuma $f_1, f_2, \dots, f_n$. Jedini uslov koji treba da bude ispunjen jeste da je svaka varijanta vrednovana po svim kriterijumima iz datog skupa. Iterativno kompromisno rangiranje, kao metoda za višekriterijumsko rangiranje alternativnih rešenja, razvijeno je na osnovu elementa iz metode kompromisnog programiranja.

Polazi se od „graničnih“ formi L_p metrike, za $p = 1$ i za $p = \infty$.

$$S_j = \sum (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-), \quad (\text{za } p=1)$$

$$R_j = \max (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-), \quad (\text{za } p=\infty)$$

gde je $f_i^* = \max f_{ij}$ i $f_i^- = \min f_{ij}$ $i = 1, \dots, n$

$$S^* = \min_j S_j \quad \text{ i } \quad R^* = \min_j R_j$$

Konačna rang-lista određuje se pomoću mere Q_j :

$$Q_j = v_1(S_j - S^*) / (S^- - S^*) + v_2(R_j - R^*) / (R^- - R^*)$$

Metoda omogućava da se zadaju i težine strategija odlučivanja v_1 i v_2 , $v_2 = 1 - v_1$

Pri tome;

- ako je $v_1 > v_2$: daje se prednost zadovoljenju većine kriterijuma, i ne vodi se računa o tome da jedan od kriterijuma može biti potpuno nezadovoljen;
- ako je $v_2 > v_1$: ne dopušta se potpuno nezadovoljenje bilo kog kriterijuma.

Primenom izabrane metode, dobija se rang-lista ili redosled varijantnih rešenja, za slučaj istih i različitih težinskih koeficijenata, odnosno donosi se konačna odluka o izboru jednog varijantnog rešenja.

the role of the balancing factor between the overall benefit and the maximal individual deviation. Small “ p ” is utilized when the group benefit has the advantage over the individual deviation. By increasing the parameter p , the overall benefit is decreasing; likewise, the maximal individual deviation from the best variation is also decreasing. By selecting the parameter p , the strategy of achieving a compromise in multicriteria optimization is adopted, as follows:

- $p = 1$ – The solution is the best according to all criteria regarded together;
- $p = 2$ – The solution is geometrically closest to the ideal point; and
- $p = \infty$ – The priority is attributed to the criterion with the largest deviations.

Decision maker can set or alter the weight of individual criteria during the process of solving the multicriteria optimization task. It is achieved by introducing weight coefficients. While solving the multicriteria optimization task in the first iteration, the compromise solutions for diverse values of the parameter $p = 1, 2, \infty$ are determined, under the condition that all criterion functions have the same weight coefficients. By analysing these results, the decision maker can determine whether to set weight coefficients, and which ones to set for the next iteration. The objective is to introduce the “weight” of individual criteria and interrogate the sensitivity of the solution in relation to weight coefficients by re-evaluating the solution of the compromise programming task.

Multicriteria compromise ranking of variation solutions is applied when it is necessary to determine the order of planned alternative solutions based on the set measures of wellness or the criteria $f_1, f_2, \dots, f_n$. The only condition to be fulfilled is that each variation is evaluated by all criteria from the provided set. Iterative compromise ranking, as a method for multicriteria ranking of alternative solutions, is developed on the basis of elements from the compromise programming method.

The starting points are the “limit” forms of L_p metrics, for $p = 1$ and for $p = \infty$.

$$S_j = \sum (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-), \quad (\text{for } p=1)$$

$$R_j = \max (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-), \quad (\text{for } p=\infty)$$

where $f_i^* = \max f_{ij}$ and $f_i^- = \min f_{ij}$ $i = 1, \dots, n$

$$S^* = \min_j S_j \quad \text{ and } \quad R^* = \min_j R_j$$

The final rank list is determined utilizing the measure Q_j :

$$Q_j = v_1(S_j - S^*) / (S^- - S^*) + v_2(R_j - R^*) / (R^- - R^*)$$

The method enables specifying the weights of the decision making strategies v_1 and v_2 , $v_2 = 1 - v_1$ as well.

Thereby:

- If $v_1 > v_2$: the advantage is conferred to satisfying the most criteria, not taking into consideration whether one of the criteria can be completely unsatisfied, and
- If $v_2 > v_1$: the complete dissatisfaction of any criteria is not permitted.

4 METODOLOGIJA VIŠEKTERIJUMSKOG ODLUČIVANJA – PRIMENA

Predložena metodologija višekriterijumskog odlučivanja, verifikovana je na primeru izbora najpovoljnijeg tipa prozora (optimalno rešenje). Vrednovani su:

- drveni prozor;
- PVC prozor;
- aluminijumski prozor;
- prozor kombinovan od dva materijala (drvo i aluminijum).

U postupak izbora optimalnog tipa prozora, u okviru svakog materijala doprozornika i krila prozora, varirana su dva tipa stakla (dvoslojno i troslojno). Karakteristike variranih tipova prozora prikazane su u tabelama 4 i 5 [14,15,16,17,18].

By applying the selected method, a rank list or the order of variation solutions is obtained, for the case of same and diverse weight coefficients, i.e. the final decision is reached on the selection of one variation solution.

4 MULTICRITERIA DECISION MAKING METHODOLOGY – APPLICATION

The proposed multicriteria decision making methodology has been verified on the example of selecting the most optimal window type (the optimal solution). The evaluated variations are the following:

- Timber window,
- PVC window,
- Aluminium window, and
- Two-material combination, timber-aluminium, window.

During the procedure of selecting the optimal type window, within each material for frames and sashes, two glass types (double glazing and triple glazing) are evaluated. The properties of the variation types of windows are presented in Tables 4 and 5 [14,15,16,17,18].

Tabela 4. Karakteristike prozora (doprozornik prozorsko krilo i staklo)

DOPROZORNIK I PROZORSKO KRILO			STAKLO	
A1		DRVENI od troslojnog lameliranog profila 68/80 sa radijalnom strukturom (smrča)		niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4-16-LowE:4 punjeno argonom , distanтни ram odbojnik ALU p=71%
				niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4:LowE-12-4-12-LowE:4 punjeno argonom distantni ram topli ram TIG p=74%
A2		$R_w = 35\text{dB (A1)}$ $R_w = 37\text{dB (A2)}$ $T_i = 60\text{god.}$
B1		PVC petokomorni profil, širine 73mm sa debljinom spolnog zida od 3mm i dve diht gume, ojačan pocinkovanim čelikom 1,2mm		niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4-16-LowE:4 punjeno argonom , distanтни ram odbojnik ALU p=71%
				niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4:LowE-12-4-12-LowE:4 punjeno argonom distantni ram topli ram TIG p=74%
B2		$R_w = 38\text{dB (B1)}$ $R_w = 40\text{dB (B2)}$ $T_i = 20\text{god.}$

Tabela 5. Karakteristike prozora (doprozornik prozorsko krilo i staklo)

DOPROZORNIK i PROZORSKO KRILO		STAKLO		
C1		<p>ALUMINIJUM Alumil M11600 Aluther Extra, povećane debljine profila i sa poliamidom na 34/38mm</p> <p>$R_w = 37\text{dB (C1)}$ $R_w = 38\text{dB (C2)}$ $T_i = 50\text{god.}$</p>	<p>dvoslojno</p>	niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4-16-LowE:4 punjeno argonom , distanтни ram odbojnik ALU p=71%
C2			<p>troslojno</p>	niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4:LowE-12-4-12-LowE:4 punjeno argonom distantni ram topli ram TIG p=74%
DOPROZORNIK i PROZORSKO KRILO		STAKLO		
D1		<p>DRVO - ALUMINIJUM drvo troslojno lamelirano radijalne strukture sa spoljašnjom aluminijumskom oblogom</p> <p>$R_w = 38\text{dB (D1)}$ $R_w = 36\text{dB (D2)}$ $T_i = 60\text{god.}$</p>	<p>dvoslojno</p>	niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4-16-LowE:4 punjeno argonom , distanтни ram odbojnik ALU p=71%
D2			<p>troslojno</p>	niskoemisiono staklo LOW-E konstrukcija izostakla 4:LowE-12-4-12-LowE:4 punjeno argonom distantni ram topli ram TIG p=74%

Table 4. Window characteristics (window frame and sash, and glass)

	WINDOW FRAME AND SASH		GLASS
		TIMBER From three-layer laminated profile 68/80 with radiant structure (fir) $R_w = 35\text{dB (A1)}$ $R_w = 37\text{dB (A2)}$ $T_i = 60\text{yrs.}$	Double glazing	Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4-16-LowE:4 Filled with argon , distance spacer bar aluminium $p=71\%$
A2			Triple glazing	Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4:LowE-12-4-12-LowE:4 Filled with argon , distance spacer thermal bar TIG $p=74\%$

		PVC Five-chamber profile, width 73mm with outer wall thickness 3mm and two rubber gaskets, strengthened with galvanized steel 1.2mm		Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4-16-LowE:4 Filled with argon , distance spacer bar aluminium $p=71\%$
B1		$R_w = 38\text{dB (B1)}$ $R_w = 40\text{dB (B2)}$ $T_i = 20\text{yrs.}$	Double glazing
				Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4:LowE-12-4-12-LowE:4 Filled with argon , distance spacer thermal bar TIG $p=74\%$
B2			Triple glazing	

Table 5. Window characteristics (window frame and sash, and glass)

	WINDOW FRAME AND SASH		GLASS	
		ALUMINIUM Alumil M11600 Aluther Extra, increased profile thickness, with polyamide at 34/38mm		Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4-16-LowE:4 Filled with argon , distance spacer bar aluminium $p=71\%$
C1		$R_w = 37\text{dB (C1)}$ $R_w = 38\text{dB (C2)}$ $T_i = 50\text{yrs.}$	Double glazing
				Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4:LowE-12-4-12-LowE:4 Filled with argon , distance spacer thermal bar TIG $p=74\%$
C2			Triple glazing	
	WINDOW FRAME AND SASH		GLASS	
		TIMBER – ALUMINIUM wood, three-layer, laminated, radiant structure with outer aluminium lining		Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4-16-LowE:4 Filled with argon , distance spacer bar aluminium $p=71\%$
D1		$R_w = 38\text{dB (D1)}$ $R_w = 36\text{dB (D2)}$ $T_i = 60\text{yrs.}$	Double glazing
				Low-emissivity glass LOW-E Isoglass structure 4:LowE-12-4-12-LowE:4 Filled with argon , distance spacer thermal bar TIG $p=74\%$
D2			Triple glazing	

4.1 Prva faza odlučivanja – GENERISANJE MOGUĆIH REŠENJA

Prva faza odlučivanja – koja podrazumeva generisanje mogućih rešenja – svodi se na izbor tipova prozora čija kombinacija materijala (doprozornika, prozorskog krila i stakla) zadovoljava granične vrednosti koeficijenta prolaza toplote prozora U_w , u skladu s Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada. Ulazni podaci za proračun dati su u tabeli 6, a sračunate vrednosti koeficijenta prolaza toplote prozora U_w – u tabeli 7.

4.1 First decision making phase – GENERATING POSSIBLE SOLUTIONS

The first decision making phase, implying the generation of possible solutions, relies on the selection of window types whose combination of materials (window frames, sash and glass) satisfies the limit values of the window heat transfer coefficient U_w , in accordance with the Regulations on Energy Efficiency of Buildings. Input data for calculations are provided in Table 6, while the calculated values of the window heat transfer coefficient U_w are shown in Table 7.

Tabela 6. Ulazni podaci za proračun koeficijenta prolaza toplote prozora
Table 6. Input data for calculating the window heat transfer coefficient

PROZOR / WINDOW	KOEFICIJENT TOPLLOTNE PROVDLJIVOSTI PROZORA U_w HEAT TRANSFER COEFFICIENT U_w	PODACI ZA PRORAČUN CALCULATION DATA
	$U_w = \frac{A_g \times U_g + A_f \times U_f + l_g \times \psi_g}{A_g + A_f}$ <p> A_g – površina stakla / glass area A_f – površina okvira / frame area l_g – dužina / length U_g – koef. topl. provod. stakla / glass heat transfer coefficient U_f – koef. topl. provod. okvira / frame heat transfer coefficient ψ_g – faktor korekcije temperature / temperature correlation factor - spoj staklo/okvir / joint glass/frame </p>	$A_g - 1.54\text{m}^2$ $A_f - 0.7\text{m}^2$ $l_g - 7.8\text{m}$ $\psi_g - 0.06$ (drvo / timber and PVC) $\psi_g - 0.08$ (aluminijum / aluminium)
TIP PROZORA – dvodelni DIMENZIJE prozora 140/160 WINDOW TYPE – two-casement DIMENSIONS of the window 140/160	Ograničenje / Limitation $U_w \leq U_{\max}$, $U_{\max} = 1.5 \text{ [W/(m}^2\text{xK)]}$	

Tabela 7. Vrednosti koeficijent prolaza toplote prozora U_w
Table 7. Values of the window heat transfer coefficient U_w

	DOPROZORNIK I PROZORSKO KRILLO WINDOW FRAME AND SASH	U_f [W/(m ² xK)]	STAKLO GLASS	U_g [W/(m ² xK)]	U_w [W/(m ² xK)]
A1	DRVO TIMBER	1.5	dvoslojno double glazing	1.1	1.434
A2			troslojno triple glazing	0.7	1.159
B1	PVC	1.3	dvoslojno double glazing	1.1	1.371
B2			troslojno triple glazing	0.7	1.096
C1	ALUMINIJUM ALUMINIUM	1.5	dvoslojno double glazing	1.1	1.50
C2			troslojno triple glazing	0.7	1.229
D1	DRVO-ALUMINIJUM TIMBER-ALUMINIUM	1,4	dvoslojno double glazing	1,1	1,402
D2			troslojno triple glazing	0,7	1,128

4.2 Druga faza odlučivanja – IZBOR OPTIMALNOG TIPa PROZORA

Druga faza odlučivanja uključuje definisanje kriterijuma, vrednovanje mogućih varijanti, primenu izabrane metode optimizacije i konačan izbor najpovoljnije varijante. Početna matrica odlučivanja, s numeričkim vrednostima kriterijumskih funkcija za osam varijanti prozora, data je u tabeli 8 [16,17,19,20,21,22].

Tabela 8. Početna matrica odlučivanja
Table 8. Initial decision-making matrix

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
f1	1.434	1.159	1.371	1.096	1.500	1.229	1.402	1.128
f2	0.29	0.260	0.29	0.260	0.29	0.260	0.29	0.260
f3	0.029	0.027	0.026	0.025	0.027	0.026	0.026	0.028
f4	268.000	336.000	224.000	290.000	403.000	448.000	493.000	672.000
f5	3.795	3.795	3.226	3.226	4.175	4.175	4.554	4.554
f6	1.000	1.000	3.000	3.000	1.200	1.200	1.000	1.000
f7	1.000	1.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.500	1.500

Primenom metoda višekriterijumskog odlučivanja (kompromisno programiranje i kompromisno rangiranje), dobijeni su izlazni rezultati, redosled varijanti i izabran najpovoljniji tip prozora. U postupku optimizacije, u prvom prolazu sve kriterijumske funkcije posmatrane su sa istim značajem. Izlazni rezultati, redosled varijantnih rešenja prikazan je u tabelama 9 i 10.

4.2 Second decision making phase – SELECTING THE OPTIMAL WINDOW TYPE

The second decision making phase includes the definition of criteria, the evaluation of possible variations, the application of the selected optimization method, and the final selection of the most optimal variation. The initial decision-making matrix, with the numerical values of criterion functions for eight window variations, is presented in Table 8 [16,17,19,20,21,22].

After applying the multicriteria decision making method (compromise programming and compromise ranking), the output results are obtained, the variations are placed in order and the most optimal window type is selected. In the optimization process in the first iteration, all criterion functions are observed with the same objective. The output results and the order of variation solutions are presented in Tables 9 and 10.

Tabela 9. Izlazni rezultati – Metoda kompromisnog programiranja
Table 9. Output results – Compromise programming method

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
p = 1	5	1	6	2	8	3	7	4
p = 2	5	1	7	3	8	2	6	4
p = ∞	5	1	7	2	8	3	6	4

Tabela 10. Izlazni rezultati – Metoda kompromisnog rangiranja - isti težinski koeficijenti
Table 10. Output results – Compromise ranking method - same weight coefficients

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
v=0.0	4	1	5	2	7	3	6	8
v=0.3	4	1	5	2	7	3	6	8
v=0.6	4	1	5	2	7	3	6	8
v=0.9	4	1	6	2	8	3	7	5
v=1.0	5	1	6	2	8	3	7	4

Nadalje, iskorišćene su mogućnosti metoda i uvedeni su različiti težinski koeficijenti, isticanjem značaja nekih pojedinačnih kriterijuma:

- ANALIZA I – naglašeni pokazatelji energetske efikasnosti, svetlosne propustljivosti i zvučne izolacije;
- ANALIZA II – naglašeni pokazatelji efektivnosti izgradnje (tržišna cena i vreme ugradnje prozora);
- ANALIZA III – naglašeni trajnost prozora i ekološki pokazatelj.

Further on, possibilities of the method are used and different weight coefficients are introduced, by emphasising the significance of certain individual criteria, as follows:

- ANALYSIS I – the emphasis is on the energy efficiency, light conductivity and sound insulation indicators,
- ANALYSIS II – the emphasis is on building efficiency indicators (market price and window installation time), and

Izlazni rezultati, redosled varijantnih rešenja prikazan je u tabelama 11, 12 i 13.

• ANALYSIS III – the emphasis is on window duration and ecological indicator.

Output results and the order of variation solutions are shown in Tables 11, 12 and 13.

Tabela 11. Izlazni rezultati - Metoda kompromisnog rangiranja - različiti težinski koeficijenti – ANALIZA I
Table 11. Output results – Compromise ranking method different weight coefficients – ANALYSIS I

$$w_1=0.3, w_2=w_3=1.5, w_4=w_5=w_6=w_7=0.1$$

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
v=0.0	7	1	4	2	8	3	5	6
v=0.3	5	1	4	2	8	3	6	7
v=0.6	3	1	4	2	7	5	6	8
v=0.9	1	2	3	4	6	5	7	8
v=1.0	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabela 12. Izlazni rezultati - Metoda kompromisnog rangiranja - različiti težinski koeficijenti – ANALIZA II
Table 12. Output results – Compromise ranking method different weight coefficients – ANALYSIS II

$$w_1=w_2=w_3=0.1, w_4=w_5=0.25, w_6=w_7=0.1$$

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
v=0.0	3	4	1	2	5	6	7	8
v=0.3	3	4	1	2	5	6	7	8
v=0.6	2	3	1	4	5	6	7	8
v=0.9	2	3	1	4	5	6	7	8
v=1.0	2	3	1	4	5	6	7	8

Tabela 13. Izlazni rezultati – Metoda kompromisnog rangiranja - različiti težinski koeficijenti – ANALIZA III
Table 13. Output results – Compromise ranking method different weight coefficients – ANALYSIS III

$$w_1=w_2=w_3=w_4=w_5=0.1, w_6=w_7=0.25$$

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
v=0.0	2	1	5	8	6	7	3	4
v=0.3	2	1	5	8	6	7	3	4
v=0.6	2	1	3	8	6	7	4	5
v=0.9	2	1	3	8	6	7	4	5
v=1.0	2	1	3	8	6	7	4	5

Izlazni rezultati vrednovanja varijanti prozora pokazali su:

- primenom metode kompromisnog programiranja, s ravnopravnim učešćem svih kriterijuma, optimalna varijanta jeste prozor tipa A2 – drveni prozor s troslojnim zastakljenjem (tabela 9)
- primenom metode kompromisnog rangiranja, s ravnopravnim učešćem svih kriterijuma, optimalna varijanta jeste prozor tipa A2 – drveni prozor s troslojnim zastakljenjem (tabela 10)
- primenom metode kompromisnog rangiranja, naglašavanjem značaja pokazatelja energetske efikasnosti, svetlosne propustljivosti i zvučne izolacije (ANALIZA I) optimalna varijanta jeste – drveni prozor (tabela 11);
 - a) tipa A1 – s dvoslojnim zastakljenjem (u strategiji odlučivanja u kojoj se ne dopušta potpuno nezadovoljenje bilo kog kriterijuma);
 - b) tipa A2 – s troslojnim zastakljenjem (u strategiji odlučivanja koja daje prednost zadovoljenju većine kriterijuma);
- primenom metode kompromisnog rangiranja,

The output results for the evaluation of window variations demonstrate the following:

- After applying the compromise programming method, with the equal participation of all criteria, the optimal variation is the window type A2 – a timber window with triple glazing (Table 9).
- After applying the compromise ranking method, with the equal participation of all criteria, the optimal variation is the window type A2 – a timber window with triple glazing (Table 10).
- After applying the compromise ranking method, emphasising the significance of the energy efficiency, light conductivity and sound insulation indicators (ANALYSIS I), the optimal variation is a timber window (Table 11):
 - a) Type A1 – with double glazing (in the decision making strategy where the complete dissatisfaction of any criteria is not permitted), and
 - b) Type A2 – with triple glazing (in the decision making strategy that provides advantage to satisfying the majority of criteria).
- After applying the compromise ranking method,

naglašavanjem značaja pokazatelja efektivnosti izgradnje, tržišne cene i vremena ugradnje prozora (ANALIZA II), optimalna varijanta jeste prozor tipa B1 – PVC prozor s dvoslojnim zastakljenjem (tabela 12);

- primenom metode kompromisnog rangiranja, naglašavanjem značaja pokazatelja trajnosti i ekologije (ANALIZA III), optimalna varijanta je prozor tipa A2 – drveni prozor sa troslojnim zastakljenjem (tabela 13).

5 ZAKLJUČAK

U radu je predložena metodologija višekriterijumskog vrednovanja i odlučivanja pri izboru najpovoljnijeg tipa prozora. Model vrednovanja definisan je sa sedam raznorodnih kriterijumskih funkcija, kako bi se obuhvatili bitni aspekti koji utiču na izbor i što realnije izabrala optimalna varijanta. Iskorišćena je mogućnost uključivanja kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma u odlučivanje i predloženi su različiti načini vrednovanja (kvantifikacije) kvalitativnih kriterijuma.

Na bazi definisanih kriterijuma za varijantna rešenja (drveni, PVC, aluminijumski i drvo-aluminijum prozor), kombinacijom dva tipa stakla (dvoslojno ili troslojno), metodom višekriterijumske optimizacije, izabrano je optimalno rešenje. Rezultati metode višekriterijumske optimizacije, kompromisno programiranje i kompromisno rangiranje sa istim težinskim koeficijentima za sve strategije odlučivanja, pokazali su da je optimalno rešenje varijanta – drveni prozor s troslojnim staklom.

U drugom delu analize variran je značaj pojedinačnih kriterijumskih funkcija uvođenjem težinskih koeficijenata. Kada se prednost da pokazatelju energetske efikasnosti (ANALIZA I) i trajnosti i ekološkom faktoru (ANALIZA III), optimalno rešenje je takođe drveni prozor. Analiza u kojoj se naglašava značaj pokazatelja efektivnosti izgradnje (tržišna cena i vreme ugradnje – ANALIZA II), prednost daje PVC prozoru.

Izlazni rezultati optimizacije potvrdili su primenljivost metodologije višekriterijumskog odlučivanja. U predloženom modelu, izborom težinskih koeficijenata, moguće je dobiti više varijanti izlaznih rezultata, što daje dobru podlogu za objektivno odlučivanje i izbor najpovoljnijeg (optimalnog) tipa prozora. Naglašavanjem značaja pojedinih kriterijumskih funkcija, moguće je tok odlučivanja uskladiti s postavljenim ciljem optimizacije.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, u okviru tehnološkog projekta TR 36017, pod nazivom: „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji”.

emphasising the significance of building efficiency indicators, market price and window installation time (ANALYSIS II), the optimal variation is the window type B1 – a PVC window with double glazing (Table 12), and

- After applying the compromise ranking method, emphasising the significance of durability and ecology indicators (ANALYSIS III), the optimal variation is the window type A2 – a timber window with triple glazing (Table 13).

5 CONCLUSION

The paper proposes multicriteria evaluation and decision making methodology for selecting the most optimal window type. The evaluation model is defined with seven diverse criterion functions in order to encircle the important aspects that influence the selection, hence choosing the optimal variation as close to realistic as possible. The method utilized the possibility to include quantitative and qualitative criteria in the decision making process and diverse evaluation methods (quantifications) of the qualitative criteria are proposed.

Based on the defined criteria for variation solutions (timber, PVC, aluminium and timber-aluminium window), and combination of two glass types (double glazing and triple glazing), the multicriteria optimization method provides help in selecting the optimal solution. The results of the multicriteria optimization method, compromise programming, and compromise ranking with the same weight coefficients for all decision making strategies, demonstrate that the optimal solution is the following variation – a timber window with triple glazing.

In the second part of the analysis, the significance of individual criterion functions is varied by introducing weight coefficients. When the advantage is attributed to the energy efficiency indicator (ANALYSIS I) and the durability and ecological indicator (ANALYSIS III), the optimal solution is also a timber window. The analysis where the significance is attributed to the building efficiency indicator (market price and installation time – ANALYSIS II), states that the advantage goes to a PVC window.

Output optimization results confirm the applicability of the multicriteria decision making methodology. In the proposed model, by selecting the weight coefficients, it is possible to obtain more variations of the output results, providing a good foundation for objective decision making and the selection of the most optimal window type. By emphasising the significance of individual criterion functions, it is possible to synchronise the decision making process with the set optimization goals.

ACKNOWLEDGEMENT

The work reported in this paper is a part of the investigation within the research project TR 36017 "Utilization of by-products and recycled waste materials in concrete composites in the scope of sustainable construction development in Serbia: investigation and environmental assessment of possible applications", supported by the Ministry for Science and Technology, Republic of Serbia. This support is gratefully acknowledged.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Zbirka tehničkih propisa, tehničkih uslova, mera i normativa u građevinarstvu 2, Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [2] Mitrović, R.: Energy efficiency and glass technology used in architectural designs, Časopis Materijali i konstrukcije 53 (2010), 3 (44-53).
- [3] Normativi i standardi rada u građevinarstvu, Građevinska knjiga, Beograd, 1985.
- [4] Opricović, S. : Optimizacija sistema, Građevinski fakultet, Beograd, 1992.
- [5] Opricović, S. Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1998.
- [6] Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada, Sl. glasnik RS br.61/11
- [7] Standard SRPS EN ISO 10077-1 Toplotne performanse prozora, vrata i kapaka-proračun koeficijenata prolaza toplote - deo 1 - opšte, Institut za standardizaciju Srbije, 2008.
- [8] Standard SRPS EN ISO 10077-2 Toplotne performanse prozora, vrata i kapaka-proračun koeficijenata prolaza toplote - deo 2 - numerička metoda za okvir, Institut za standardizaciju Srbije, 2013..
- [9] Standardi SRPS ISO 140 Akustika - merenje zvučne izolacije u zgradama i zvučne izolacije građevinskih elemenata, Institut za standardizaciju Srbije, 2005.
- [10] <http://www.pvcinzingering.co.rs/cenovnik-aluminijumskih-prozora.html>
- [11] Standard SRPS EN ISO 14351-1 Prozori i vrata, standard za proizvod karakteristike i performanse - deo 1, Institut za standardizaciju Srbije, 2011.
- [12] Harmati, N., Folić, R., Magyar, Z.: Energy performance modelling and heat recovery unit efficiency assessment of an office building, Thermal Science, 2015, DOI REF:10.2298/TSCI140311102H, <http://thermalscience.vinca.rs/online-first/1363>
- [13] Štromar, Ž., Zagorec, M.: Tehnički uvjeti, odabir i ispitivanje prozora prije ugradnje, Časopis Građevinar 61(2009), 12 (1153-1161).
- [14] <http://www.unidas.co.rs/download/Tabela-prednosti-razlike-stolarije.pdf>
- [15] <http://www.dualstolarija.com/staklo/tipovi-stakala>
- [16] http://www.hram032.rs/dvokrilni_prozori.html
- [17] <http://www.drvoalu.com/drveni-prozori/>
- [18] <http://www.drvoalu.com/prozori/>
- [19] <http://www.tim-bg.co.rs/stolarija-alu-portali-sa-termo-prekinutim-mostom>
- [20] <http://www.hram032.rs/pdf/cenovnik-salamander-exclusive.pdf>
- [21] <http://www.pvc-stolarija-beozan.com/cene.html>
- [22] <http://www.ibcapital.rs/cenovnik>

REZIME

VIŠEKRITERIJUMSKO VREDNOVANJE I IZBOR PROZORA

Jasmina DRAŽIĆ
Mirjana LABAN

Izbor prozora koji objedinjuje i ispunjava zahteve korisnika zgrade, projektanta i izvođača radova, podrazumeva višekriterijumsku analizu. U radu je prikazana metodologija višekriterijumskog odlučivanja, kojom se dolazi do najpovoljnije varijante (tipa prozora). Definisan je model optimizacije sa sedam kriterijumskih funkcija i izabrana adekvatna metoda optimizacije. Metodologija je potvrđena na primeru izbora jedne od osam varijanti prozora. Usvojena metoda, izborom težinskih koeficijenata, donosi odluku predlaže više različitih izlaznih rezultata i pruža mogućnost usvajanja konačnog (optimalnog) rešenja, usklađenog sa ciljem optimizacije.

Ključne reči: prozor, višekriterijumsko odlučivanje, optimizacija, varijante, kriterijum, metoda

SUMMARY

MULTICRITERIA EVALUATION AND WINDOW SELECTION

Jasmina DRAŽIĆ
Mirjana LABAN

The selection of windows that joins and fulfils demands by the building's users, designers and contractors implies the multicriteria analysis. The paper presents the multicriteria decision making methodology for achieving the most optimal variation (type of window). The optimization model is defined with seven criterion functions and the adequate optimization method is selected. The methodology is confirmed on an example of a selection of one out of eight window variations. The adopted method, by selecting the weight coefficients, proposes to the decision maker several different output results and offers the possibility to adopt the final (optimal) solution that is in accordance with the optimization goal.

Key words: window, multicriteria decision making, optimization, variations, criterion, method